

감광성 폴리이미드 재료를 가정한 다중모드 간섭 편광분리 소자의 최적설계 Optimized design of the multimode interferenced-polarization splitter with a photodefinable polyimide

홍정무, 류현호, 정재완, 이승걸, 이일항, 박세근, 오범환*, 우덕하, 김선호
(Jung Moo Hong, Hyun Ho Ryoo, Jae Wan Jeong, Seung Gol Lee, Il-Hang Lee, Se-Geun Park, Beom-hoan O,
Deokha Woo, Sunho Kim)

Abstract

The beam splitter is important in optical communication systems. In this work, the quasi-static based on four-mode interference in the MMI coupler is proposed, and so, device length is shorten to be 1/5 of general designed length. We designed the polarization splitter based on the concept of quasi-static. The analysis has been accomplished by the effective index method(EIM) and the mode propagation analysis(MPA) for given structure.

Key Words(중요용어) : 다중모드간섭기, 편광분리기, Quasi-state

1. 서론¹⁾

시스템의 크기와 무게의 축소, 그리고 집적화에 따른 동작속도 및 동작전압감소, 가격감소 등의 장점으로 인하여 최근 광집적회로에 대한 관심이 고조되고 있다. 광집적회로내에서 광신호의 분리와 결합, 경로배정 및 파장분리 등의 기능소자로서 다중모드 간섭기는 우수한 특성과 공정의 용이성으로 인하여 많은 연구가 이루어져 왔다 [1]. 지금까지 이러한 다중모드간섭을 이용한 소자의 추가적인 특성개선과 더불어 소형화를 위한 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 다중모드 간섭영역의 도파 구조 형태를 변형하여 소자길이를 줄인 결과도 보고되었다 [2]. 그러나 다중모드간섭기를 이용하여 임의의 두 빛을 분리할 때, 두 빛에 대한 유효절편차이가 작으면 소자의 길이가 불가피하게 길어지며, 이로 인해 소자의 집적화 및 특성에 한계를 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 특정한 다중모드간섭조건에서 형성되는 Quasi-static를 새롭게 제안하고, 이를 이용하여 소자

의 길이를 줄임과 동시에 손실 및 분리특성을 개선할 수 있는 방안을 모색하였다.

본 연구에서는 이러한 Quasi-state를 이용하여 최초로 다중모드간섭기형 편광분리소자를 복굴절을 가지는 도파로를 가정하여 고안하였다. 한편 편광분리기는 fiber communication system에 필수적인 요소로서 fiber sensors, PMD(polarization mode dispersion) compensator 등에 널리 응용되어지고 있으며, 지금까지는 주로 비대칭 구조의 Y-분기 도파로나 Mach-Zehnder Interferometer 구조의 편광분리 소자가 보고 되어왔는데 [3], 이러한 광학적 비대칭 구조를 만들기 위해서는 광표백(photo-bleaching)이나 폴링(poling)등 추가적인 공정 과정이 필요했다 [4-5]. 그러나 물질 자체의 복굴절을 이용하는 다중모드간섭기 형태의 편광분리기는 이러한 추가적인 공정 없이 소자의 제작이 가능한 장점을 가진다. 여기서는 quasi-static를 이용한 편광분리기의 설계만을 다루었으며, 소자 설계를 위해 유효굴절률법과 [6], 모드전파해석을 통하여 다중모드간섭 현상을 분석하였다 [1].

* 인하대학교 정보통신공학부
(인천시 남구 용현동 인하대학교,
Fax: 032-875-5882
E-mail:obh@inha.ac.kr)

2. 이론 (Quasi-state의 도입)

표 I α 값에 따른 광세기 분포 및 출력상태(bar 또는 cross state) 비교

	Normal-state	Quasi-state
condition	$\alpha = 3n$ (n: integer)	$\alpha = 3n \pm 3/5$ (n: integer)
$P(x, \alpha L_x)$	$\sum_{\nu=0}^3 c_{\nu}^2 \psi_{\nu}^2 + (-1)^n \times 2 [c_0 c_3 \psi_0 \psi_3 + c_1 c_2 \psi_1 \psi_2]$ $+ 2\zeta [(c_0 c_2 \psi_0 \psi_2 + c_1 c_3 \psi_1 \psi_3) + (-1)^n \times (c_0 c_1 \psi_0 \psi_1 + c_2 c_3 \psi_2 \psi_3)]$	
	$\zeta = 1$	$\zeta = 0.309$
bar state	n = even	n = odd
cross state	n = odd	n = even

다중모드간섭을 이용한 소자는 기본적으로 자아결상(Self-Imaging, SI) 원리를 따르며, 다중모드간섭기 내에 (M+1) 개의 모드가 존재할 때 모드 분포함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi(x, z) = \sum_{\nu=0}^M c_{\nu} \psi_{\nu}(x) \exp[i(\beta_0 - \beta_{\nu})z] \quad (1)$$

여기서 ν 와 c 는 각각 모드차수와 입력광에서 전파모드로의 여기계수를 나타내며, $\psi(x)$ 는 전파모드의 함수를 나타낸다. 이때의 모드 분포함수는 진행 거리에 따라 주기적인 결상을 하게 되며, 이에 관한 내용은 soldano et al. [1] 의 논문에서 자세하게 기술되어 있다. 일반적으로 백동길이가 L_x 를 $\pi/(\beta_0 - \beta_1)$ 로 정의하면 진행거리가 $3L_x$ 의 홀수배일 때 cross-state의 단일상을, 짝수배일 때는 bar-state의 단일상을 형성한다. 이러한 다중모드간섭현상으로부터 서로 다른 두 빛의 백동길이 차이를 이용하여 두 빛을 bar와 cross-state로 분리할 수 있다. 그러나 두 빛의 백동길이 차이가 작은 경우, 분리길이가 매우 길어지게 되며, 이로 인해 파장분리의 경우 파장의 차이가 비교적 큰 경우에 대한 연구가 주로 이루어져 왔다. 또한 대부분의 경우 편광상태에 따른 백동길이의 차이가 매우 작아 다중모드간섭기형 편광분리기는 매우 길어지므로 이에 관한 연구는 거의 이루어지지 않아왔다. 그러나 본 논문에서는 최초로 Quasi-state의 개념을 도입하여, 보다 효율적인 다중모드간섭기형 분리소자의 구현 가능성을 제시하고자 한다.

특히 4개 모드의 간섭에 대한 분포함수를 고려하였을 때, 식 (1)로부터 특정한 진행거리 αL_x 에서의 광 파워 및 결상특성을 표 I과 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 자아결상원리에 따른 일반

적인 단일상을 "Normal-state"라고 하였고, Normal-state의 결상거리 전후로 형성되는 불완전한 단일상을 "Quasi-state"라고 명칭하였다.

여기서 Normal-state와 Quasi-state를 구분 짓는 요소는 ζ 임을 알 수 있는데, ζ 와 곱해지는 4개의 항들은 4개 모드의 여기계수들이 대칭적인 분포를 가질 때 모두 같은 크기를 가지며, 이러한 조건에서 비교적 단일상에 근접한 Quasi-state가 형성된다. 이때 도파로간 간격을 조정함으로써 4개 모드의 여기계수를 대칭적으로 분포하게 할 수 있다. 여기서 서로 다른 두 빛이 각각 Normal-state와 Quasi-state를 가지게 하면, 분리길이를 일반적인 경우에 비하여 1/5로 줄일 수 있다.

일반적으로 소자가 길어지면 도파로 내의 전파손실이 증가하고, 길이에 비례하여 모드간 위상오차가 커지게 되며, 이로 인해 결상길이에서 모드간 위상정합이 제대로 이루어지지 못하여 분리특성이 저하된다 [7]. 따라서 소자의 길이를 1/5로 줄이는 것은 단순히 크기를 줄이는 것을 벗어나서 분리특성에 있어서도 중요한 의미를 가진다. 그러나 Quasi-state는 앞에서도 언급했듯이 불완전한 단일상으로서 Normal-state에 비하여 필연적인 손실을 가지게 되는데, 일반적으로 2dB 정도의 크기를 가진다. 본 연구에서는 모드간 위상오차가 Quasi-state의 결상특성에 미치는 영향을 살펴봄으로써 보다 효율적인 분리소자를 구현할 수 있었다. 따라서 일반적으로 결상특성의 개선을 위하여 모드간 위상오차를 줄이는 것이 필요했으나, Quasi-state를 이용하는 경우에 있어서는 인위적인 모드간 위상오차를 가지게 함으로써 Quasi-state가 가지는 필연적인 손실을 1dB 이내로 줄일 수 있음을 확인하였다. 표 II에는 Quasi-state를 이용하여 A와 B 두 종류의 빛을 분리하고자 하는 경우에 가져야 할 조건들과 특성을 정리하였다.

표 II "Normal-state" 또는 "Quasi-state" 를 이용한 분리소자에서 필요로 하는 모드조건과 백동길이 비, 분리길이 및 필연적인 손실여부 비교 (m, n은 서로소인 자연수)

A - B	mode condition	beat length ratio (TE:TM)	split length	inevitable loss	required phase errors
normal-normal	x	m:n	L_s	x	minimum
normal-quasi	4 mode interference &	$(5n-1):5n$	$1/5 \times L_s$	x	(+)
quasi-normal		$5n:(5n+1)$	$1/5 \times L_s$	x	(-)
quasi-quasi	symmetric coefficients	$(5n-1):(5n+1)$	$2/5 \times L_s$	o	minimum

다음 장에서는 이러한 Quasi-state의 개념을 이용하여 다중모드간섭기형 편광분리 소자를 구현하고, 그 제반 특성을 확인하고자 한다.

3. Quasi-state를 이용한 편광분리기 설계

단일모드 도파로와 간섭기의 폭은 각각 $2.8 \mu\text{m}$, $8 \mu\text{m}$ 로 설정하였고, 다중모드간섭기형 편광분리기의 구조를 그림 1에 개략적으로 나타내었다.

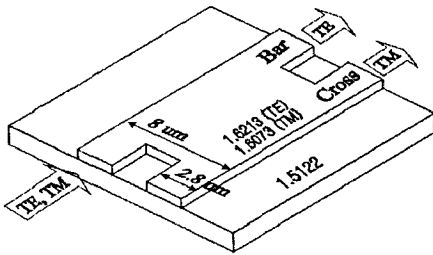


그림 1 다중모드간섭기형 편광분리기의 개도

여기서 TE/TM의 백동길이는 약 20:21의 정수비를 가지며, 자아결상원리로부터 다음과 같이 편광분리 길이를 구할 수 있다.

$$21 \times (3L_x^{\text{TE}}) = 20 \times (3L_x^{\text{TM}}) = 5703 \mu\text{m}$$

위 식에서 L_x 는 백동길이이로서 $\pi/(\beta_0 - \beta_1)$ 로 정의되며, $3L_x$ 는 일반적인 단일상의 형성주기를 의미한다. 출력도파로들은 서로간의 결합을 최소화하기 위해 간섭기의 가장자리에 위치하도록 하였으며, 이때 도파로와 간섭기 사이의 중심간격(s)은 $2.6 \mu\text{m}$ 가 된다. 소자길이에 따른 TE/TM 출력광 파워를 각각 그림 2에 나타내었다. 한편 TE/TM에 대

한 소광비(Extinction Ratio; ER) 및 손실(Excess Loss; EL)을 다음과 같이 정의하였다.

$$ER = 10 \log_{10}(P_{\text{Bar}}/P_{\text{Cross}}) \quad (2)$$

$$EL = -10 \log_{10}(P_{\text{out}}/P_{\text{in}}) \quad (3)$$

여기서 P_{out} 은 원하는 도파로로 전송되는 TE 또는 TM의 파워를 의미한다. 그림 2에서 $5658 \mu\text{m}$ 의 길이에서 TE/TM 편광에 대한 ER은 29, 19 dB인 반면, EL은 모두 5 dB 근처로 매우 큼을 알 수 있다. 또한 $5680 \mu\text{m}$ 에서 TE/TM 모두 손실은 1 dB 이하로 작으나, 소광비는 10 dB 이내로 저조하다. 이는 각 모드의 위상오차로 인해 자아결상에 근거한 단일상이 제대로 형성되지 못하기 때문이다 [7].

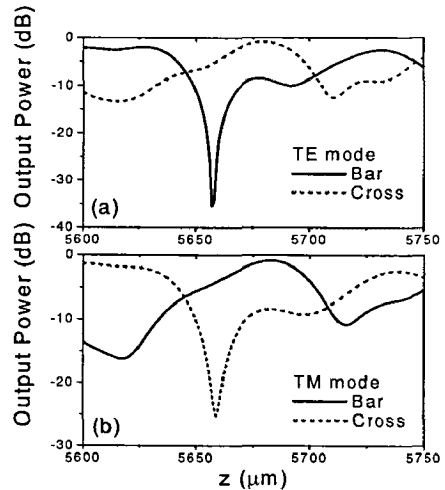


그림 2 일반적 설계방식에 의한 편광분리기의 bar와 cross 도파로에서의 출력광세기 비교. (a) TE (b) TM

이와 같이 일반적인 설계방식에 의한 다중모드간 섭기형 편광분리기는 소자의 길이가 길뿐 아니라 위상오차의 영향으로 인해 특성개선에 한계를 가진다. 따라서 앞에서 언급했던 바와 같이 Quasi-static를 이용하여 편광분리소자를 구현할 경우 분리길이는 다음과 같이 계산된다.

$$20\left(\frac{3}{5}L_r^{TE}\right) = 19\left(\frac{3}{5}L_r^{TM}\right) \approx 1085\mu\text{m}$$

이 부분에서의 출력파워를 TE, TM 모드에 대하여 각각 그림 3의 (a)와 (b)에 나타내었다.

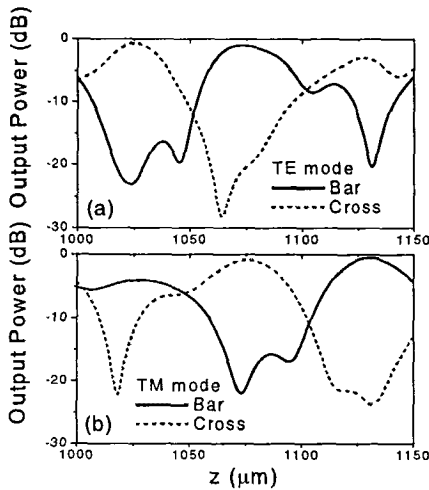


그림 3 Quasi-static를 이용한 편광분리기의 bar 와 cross 도파로에서의 출력광세기 비교. (a) TE (b) TM

최적 편광분리길이는 모드간 위상오차로 인하여 예상길이보다 다소 짧은 $1073\mu\text{m}$ 가 되었으며, 이로부터 소자의 길이를 획기적으로 줄이는 동시에 전반적인 편광분리특성의 개선이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 4개 모드의 간섭에 의해 형성되는 Quasi-static를 처음으로 소개하였고, 특정한 모드계 수분포 조건과 인위적인 위상오차를 이용하여 Quasi-static를 효율적으로 개선할 수 있음을 보였다. 이러한 원리를 편광분리에 적용함으로써 매우 짧은 길이를 갖는 새로운 개념의 편광분리기를 구현할 수

있었고, 이때 편광분리 길이를 1/5 정도로 줄임과 동시에 1dB 이내의 손실 및 20dB 이상의 소광비 특성을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications," J. Lightwave Technol., Vol. 13, No. 4, pp. 615-627, 1995.
- [2] David S. Levy et al., "Fabrication of Ultracompact 3-dB 2x2 MMI Power Splitters," IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 110, No. 8, pp. 1009-1011, 1999.
- [3] L. B. Soldano et al., "Mach-Zehnder interferometer polarization splitter in InGaAsP/InP," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 6, No. 3, pp. 402-405, 1994.
- [4] S. S. Lee, S. Garner, A. Chen, V. Chuyanov, W. H. Steier, L. Guo, L. R. Dalton and S. Y. Shin, "Patterned birefringence by photoinduced depoling in electro-optic polymers and its application to a waveguide polarization splitter", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, No. 21, pp. 3052-3054, 1998.
- [5] M. C. Oh, S. S. Lee, S. Y. Shin, W. Y. Hwang, and J. J. Kim, "Polymeric waveguide polarization splitter based on poling-induced birefringence" Electron. Lett., Vol. 32, No. 4, pp. 324-326, 1996.
- [6] T. Tamir (2nd Ed.), "Guided-wave optoelectronics," New York: Springer Verlag, ch. 2, 1990.
- [7] 홍정무, 오병환, 이승걸, 이일항, 우덕하, 김선호, "자아결상원리의 오차 해석을 통한 다중모드간섭기의 최적화," 한국광학회지, Vol. 13, No. 1, pp. 38-43, 2002.